



TITLE:

3次元フォトリック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御の理論検討(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

権平, 皓

CITATION:

権平, 皓. 3次元フォトリック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御の理論検討. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-09-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19998>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（工学）	氏名	権平 皓
論文題目	3次元フォトニック結晶光配線技術構築に向けた光伝搬制御の理論検討		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、3次元フォトニック結晶における光伝搬制御に関して、体系的な理論検討を行い、3次元光配線技術構築の基礎となる結果をまとめたものであって、6章からなっている。</p> <p>第1章は、序論であり、フォトニック結晶の研究背景と、3次元フォトニック結晶の利点について述べられている。</p> <p>第2章は、研究の基礎となるストライプ積層型3次元フォトニックの基礎特性について述べられている。まず、3次元フォトニック結晶の結晶構造について述べ、それを基に、種々の導波路および共振器を設計できることが述べられている。そして、3次元フォトニック結晶の結晶方位を考慮して設計した導波路を組み合わせることで、3次元光伝搬が可能であることが述べられている。</p> <p>第3章は、3次元フォトニック結晶の内部と外部を接続する、導波路の入出力特性について解明し、その効率を向上させる手法について述べられている。まず、第2章にて述べた積層型斜め導波路を用いることにより、3次元フォトニック結晶の上方あるいは下方から光を入出力可能であることが述べられている。</p> <p>つづいて斜め導波路から外部への光出力特性について詳細に検討が行われている。その中で、斜め導波路から自由空間への光を出力する際には出射界面において3次元フォトニック結晶の表面モードによって損失が生じること、そして、出射光が垂直から傾いて放射されることを明らかにしている。これにより、外部へ利用可能な割合は20-30%程度に留まることを示している。これに対して、前者に対しては表面構造の変更による表面モードの除去により損失低減が得られること、後者に対しては導波路終端部の構造の設計により垂直放射が得られることを提案し、最大で70%程度まで出力効率を増大させられることが示されている。</p> <p>また、光入力特性の解析も行われている。垂直入射するガウスビームに対して入力効率を検討し、偏光及び照射位置、周波数の依存性を解析し、体系的な検討を行っている。そして、前述の導波路終端構造の設計は光入力効率も増大させられることを示している。</p> <p>第4章は、3次元フォトニック結晶により多数の導波路を集積した光インターコネクション応用を見据えて、導波路の集積性について検討を行ったものである。3次元フォトニック結晶導波路の集積性を有限差分時間領域法およびモード結合理論により導波路間の結合特性（クロストーク）を解析して集積性を明らかにしている。</p> <p>まず、単一の種類の導波路を集積していくことについて検討し、3次元フォトニック結晶の内部へ並列に配置する場合、そして、立体的に交差する場合について検討を行っている。その結果、伝搬させたい距離を 500 μm、許容されるクロストークの値を</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	権平 皓
<p>-40dB としたときに、並列配置の場合は面内に 6-7 μm, 積層方向に 5.5 μm だけ離す必要がある一方で、直交配置させる場合には 2.2 μm 程度離せば良いことを明らかにしている．さまざまな配置の中で、ストライプ積層型 3 次元フォトニック結晶の構造異方性に由来して、集積性にも異方性が生じることを示している。</p> <p>また、導波路間の結合には強い周波数依存性があることを示し、それに対して導波路の固有モードの観点から考察が行われ、導波路の電界分布の周波数依存性によって導波路間の結合特性の周波数依存性がよく説明できることが述べられている。</p> <p>さらに、複数種類の導波路を組み合わせることで、結合を抑制し、集積性を向上させることも検討され、並列配置および立体交差のいずれの場合でも集積密度を 1.6 倍まで増大させられることが示されている。</p> <p>第 5 章は、高機能かつ高効率な光回路の実現へ向けて 3 次元フォトニック結晶の導波路および共振器の結合系の実現へ向けた検討について述べられている。3 次元フォトニック結晶において光が伝搬しないフォトニックバンドギャップ帯域における光の振る舞いを定量的に解析するべく、複素バンド理論を導入している。これにより、伝搬できない光が減衰しつつ進入する減衰モード（エバネッセントブロッホモード）の解析が行われている。有限差分時間領域法による減衰モードの解析方法を提案し、その実空間分布や結合のしやすさ、そして周波数および波数依存性を明らかにしている。これにより、導波路や共振器の特性をより詳細に議論することが可能になっている。</p> <p>前章にて議論した水平導波路に対して、クロストークの周波数依存性は導波路の欠陥モードに起因するが、それ自身はさらにフォトニック結晶の減衰モードに起源を持っていることを示している。特に、導波路の結合特性に対しては、周波数依存性よりも分散関係によって決定される波数依存性が重要であることを明らかにしている。</p> <p>さらに、共振器の共振モードについても、複素バンド構造の観点から考察が行われている。共振器からの光の広がり、共振器の面内波数を保存したまま減衰モードへ結合することによって決まることを明らかにしている。くわえて、共振器の設計において重要となる積層数依存性についても減衰モードの観点から考察を行うと明快に説明できることを示している。そして、共振器と導波路の結合において、その立体配置に関して減衰モードと光の広がり、共振器の面内波数を保存したまま減衰モードへ結合することによって決まることを明らかにしている。くわえて、共振器の設計において重要となる積層数依存性についても減衰モードの観点から考察を行うと明快に説明できることを示している。そして、共振器と導波路の結合において、その立体配置に関して減衰モードと光の広がり、共振器の面内波数を保存したまま減衰モードへ結合することによって決まることを明らかにしている。</p> <p>第 6 章は、結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の展望を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、立体的な光制御が可能な 3 次元フォトニック結晶により、次世代光配線技術を構築するべく、その光伝搬制御に関して理論的に検討したのであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 結晶の上部あるいは下部方向から、入出力可能な導波路においてその入出射特性および伝搬特性の解明とその改善法を示した。
2. 高密度光配線の実現へ向けた導波路間の結合の様子を定量的に解析し、集積密度の改善方法を示した。
3. 導波路に加えて共振器も含めたより高機能な光配線技術を構築するべく、3 次元フォトニック結晶による光閉じ込めの振る舞いを定量的に解析する手法を提案し、それによる導波路および共振器特性解明及び新設計指針への展開を示した。

本論文で構築された 3 次元フォトニック結晶の光伝搬制御の体系的知見は、立体光配線技術構築の基礎を成す重要な成果と言える。すなわち、本論文で得られた知見は、フォトニック結晶による高機能な光回路および光配線の実現へ繋がり、半導体光制御およびナノフォトニクス研究の推進へ寄与すると期待できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 8 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。